

# 屋外開水路実験における橋台洗掘の再現と数値解析

Abutment scouring by a flood experiment in an open channel and a numerical simulation

北見工業大学 学生員 ○鈴木光(Hikaru Suzuki)  
 北見工業大学 正会員 川尻峻三(Shunzo Kawajiri)  
 北見工業大学 正会員 齊藤剛彦(Takehiko Saito)

北見工業大学 正会員 宮森保紀 (Yasunori Miyamori)  
 北見工業大学 正会員 渡邊康玄 (Yasuharu Watanabe)  
 北見工業大学 正会員 山崎智之 (Tomoyuki Yamazaki)

## 1. はじめに

近年、記録的な降雨が北海道の各地で記録され、橋梁の下部構造についても洗掘や背面土の流出などの被害が頻発している。これらの被害では橋脚の洗掘のみならず、河川増水時に水衝部となった橋台の支持地盤が洗掘を受け傾斜・転倒したり、フーチングなどの鉄筋コンクリート部材が損傷したりする事例が見受けられた。また、ウィングがパラレルタイプの橋台では、特に背面土が流出しやすく、取付道路が陥没するような人命にかかわる被害が発生した。

著者らは 2016 年北海道豪雨災害以降、直接基礎のパラレルタイプの橋台を対象に、実験水路を用いた河川増水時の再現実験と、有限要素法による非線形静的解析によって被災状況を再現し、支持地盤の洗掘が橋台の構造安定性や損傷に与える影響を検討してきた。本研究では、多目的屋外開水路に設置した直接基礎の単径間橋梁模型を対象に、河川増水時を再現した実験を行い、洗掘による橋台の傾斜を再現した。実験中には橋台の傾斜および橋台内部の鉄筋に生じるひずみを計測し、実験後に橋台を撤去し、フーチング下面の洗掘深さを測定した。さらに実験で確認されたような現象を定量的に評価できるように、有限要素法を用いて橋台をモデル化した。フーチング底面は各節点に地盤パネを接続し、これを段階的に削除することで支持地盤の洗掘を再現した。このモデルに対して橋台及び橋桁の自重による鉛直方向変位を非線形静的解析で求め、洗掘方向と洗掘割合を変化させた場合の橋台フーチング下面の傾斜角を求めて実験結果と比較したので、その結果を報告する。

## 2. 多目的屋外開水路を用いた河川増水時の再現実験

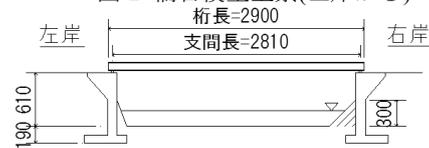
### 2.1 実験目的と概要

本実験は、橋台基礎付近の土砂の侵食・流出機構の解明および、浸食による橋台の傾斜発生の有無や時間的変化の把握を目的とした。

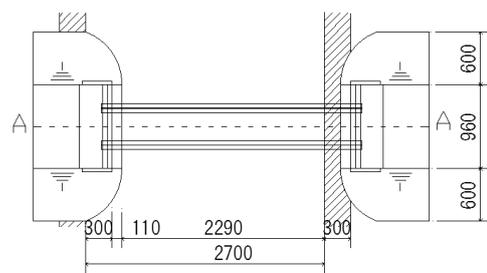
実験は 2019 年 5 月 28 日に北見工業大学オホーツク地域創生研究パーク（北見市若松）に整備した多目的屋外



図-2 橋台模型全景(左岸から)

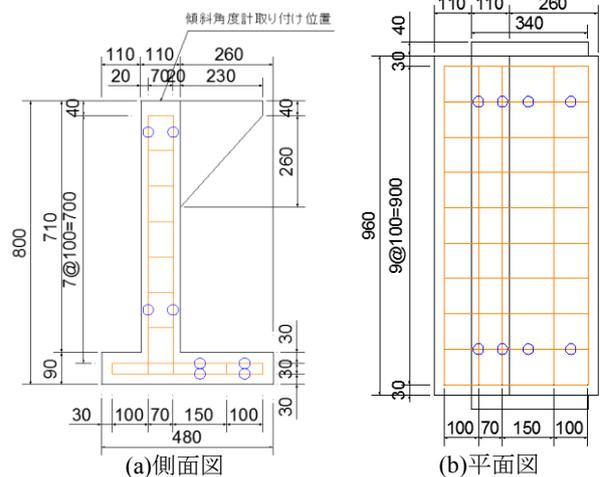


(a)A-A 断面



(b)平面図

図-3 橋梁模型周辺



(a)側面図

(b)平面図

図-4 橋台寸法と配筋 (○はひずみゲージ貼り付け位置)

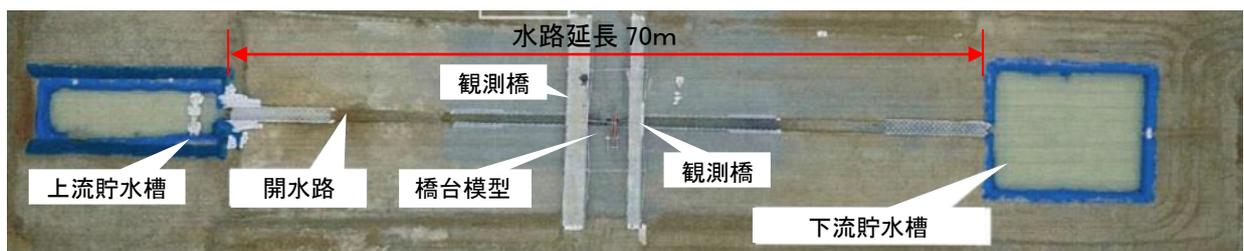


図-1 屋外開水路実験場全景

開水路を用いて行った。図-1に屋外開水路実験場の全景を示す。実験水路は延長 70m で上下流端に貯水槽を設け、ポンプで水を循環させた。

図-2に橋梁模型全景、図-3に橋梁模型の一般図、図-4に橋台の寸法と配筋を示す。水路幅は3mで深さ0.3mである。実験時に橋台背面盛土および橋台基礎付近において局所的な洗掘を発生させるため、左岸側の橋台を0.3m水路側へ突出させた。また、左岸は粘性土、右岸は砂質土で橋台背面盛土を構築している。

橋梁は支間 2.81 m の単純桁とし、両岸に図-3のような鉄筋コンクリート製橋台を設置した。鉄筋はD10の異形鉄筋で、ウィングは合板で製作し橋台躯体に取り付けた。上部構造は2本のH形鋼(H100×100×5×7.5)とし、支点はφ25 mmの丸鋼としたが、固定支点側は沓座にねじ込んだネジで丸鋼を固定した。

橋梁の変状は橋台天端に2軸傾斜角度計(緑測器ESC3000Z)を取り付けるとともに、左岸側橋台の主鉄筋にひずみゲージを貼り付けて測定した。測定はひずみ計測用データロガー(共和電業 UCAM-20PC-1)を用いた。測定用ソフトウェアは共和電業 IM-A-713B\_USC-60Bを使用した。測定は実験開始後から終了までの約2時間を4秒間隔で行った。さらに、左岸橋台の上流側に温湿度計(HIOKI LR5001)を設置して1分間隔で測定した。

2.2 傾斜角とひずみの変化

図-5に両岸の橋台傾斜角の時刻歴を示す。左岸橋台は実験開始後から緩やかに水路側へ傾斜し45分後頃に水路側へ約0.2°傾いた。さらに1時間45分頃には水路側に約0.2°、上流側に約0.4°傾いた。右岸橋台では実験開始後1時間25分頃に水路側と上流側に約0.1°、2時間5分後頃に水路側に約0.4°、上流側に約0.3°傾いた。実験終了時の傾斜角は、左岸側は水路側に0.45°、上流側に0.27°、右岸側橋台は水路側に0.60°、上流側に0.45°だった。

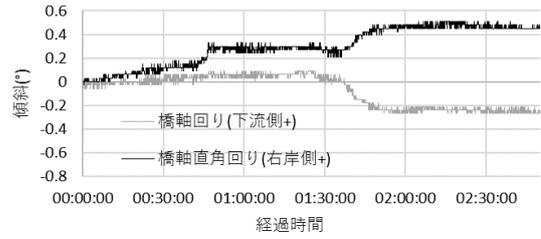
傾斜角の変化が一定ではなく、ある時点で大きく変化するのは、洗掘されフーチング下に滞留していた土砂が一気に流出したものと考えられる。いずれの橋台も水路側かつ上流側に傾斜しているが、水衝部となるように水路内に突出させた左岸側の方が、傾斜の発生開始が早かった。一方、実験終了時の傾斜角は右岸側の方がやや大きくなった。

ひずみの測定結果の一例として2カ所のひずみと橋台の温度の時刻歴を図-6に示す。ひずみはいずれも実験開始後やや圧縮側に変化しているが、鉄筋の塑性ひずみと比較してかなり小さく、その変化もおおむね温度に連動していることから、構造内部の応力変化は小さく、橋台模型に構造的な損傷は発生しなかったといえる。

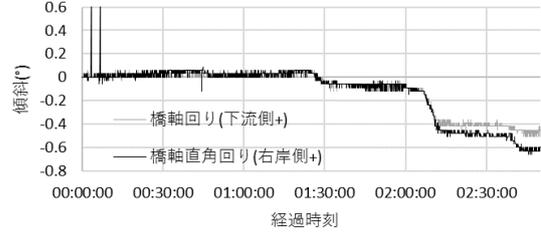
2.3 フーチング下の洗掘状況

実験後、開水路から十分に排水が完了した9月23日に、橋台をクレーンで鉛直方向に吊り上げフーチング下の洗掘状況を確認した。図-7に橋台撤去後のフーチング下面の様子を示す。

洗掘深は、フーチング下面を橋軸方向、橋軸直角方向に5cm間隔で区切り、メジャーを用いて計測した。計測値において最も広く平坦になっている点の深さ(最頻値)



(a) 左岸側橋台の傾斜時刻歴



(b) 右岸側橋台の傾斜時刻歴

図-5 橋台傾斜角の時刻歴

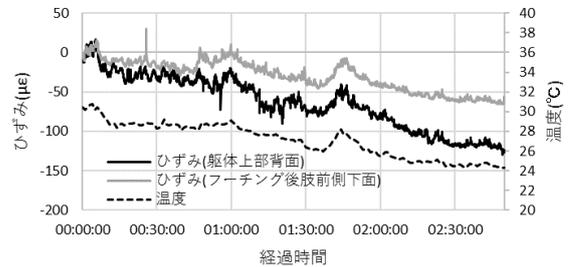


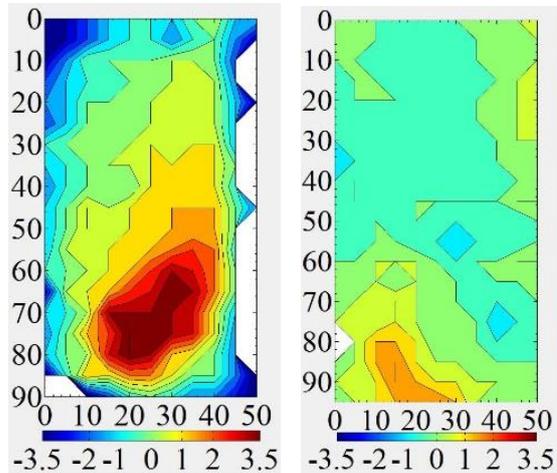
図-6 橋台模型上流側のひずみと温度の時刻歴



(a)左岸側

(b)右岸側

図-7 実験後フーチング下面



(a)左岸側

(b)右岸側

図-8 洗掘深コンター(cm)

を洗掘深 0cm として整理し、洗掘状況を図-8 に図化した。洗掘深は、左岸側で最大 4cm、右岸側で最大 2cm だった。また、洗掘の度合いを表す指標として、洗掘深が 0cm より大きい測点の数を、全測点数で除した洗掘の割合を求めた。なお、実験で洗掘が始まった水路側および上流側の端部で、橋台を吊り上げた際に周辺の土砂が崩れた部分も洗掘された点とみなし、また、下流側や背面盛土側の端部で橋台を吊り上げた際に底面が圧縮されて深くなった部分は除いて計算した。洗掘の割合は左岸側が約 63%、右岸側が約 20% となった。右岸側と比べて左岸側がより洗掘範囲が広く、このことは上述した洗掘深や傾斜角と同様、左岸側橋台から先に洗掘が始まったことと対応していると考えられる。

### 3. 有限要素法による非線形静的解析

#### 3.1 解析モデルの構築と解析条件

橋台フーチング下面が洗掘を受けた場合の橋台および橋桁の自重による変位およびコンクリートのひび割れを求めるため、有限要素法を用いた非線形静的解析を行った。解析ソフトは、有限要素法解析プログラムである midasFEA を用いた。

解析対象はパラレルタイプの橋台を有する単純桁橋とし、典型的な実橋の図面を参考に図-9 のように設定した。

モデル化に際して、橋台のコンクリートは非線形なソリッド要素とし、関数モデルは圧縮関数を Thorenfeld モデル ( $\sigma_{ck}=21\text{N/mm}^2$ ) で表現し、引張関数を  $f_t=2\text{N/mm}^2$  で塑性化する完全弾塑性の応力ひずみ関係で表現した。鉄筋はトラス要素で表現し、バイリニアの非線形特性を与え降伏応力は  $345\text{N/mm}^2$  で von Mises の降伏条件を用いた。主桁及び床版は線形ソリッド要素で表現した。

支点部は 2 節点バネ要素で表現した。支点部の境界条件は 6 自由度のうち橋軸方向と橋軸直角回りを固定した側を可動側、橋軸直角回りを固定した側を固定側とした。

表-1 に支点部のバネ定数を、表-2 に材料の物性値を示す。また、図-10 に FEM モデルの全景を示す。

地盤は、砂質地盤の場合、一般的に良質な支持層とみなされる N 値 30 を基準とし<sup>2)</sup>、橋台のフーチング下面の各節点には節点バネ要素として圧縮方向の剛性を持つ圧縮専用の地盤バネを設置することで支持地盤を表現した。また、橋台フーチング下面の地盤バネを段階的に削除することで洗掘を表現した。洗掘の割合はフーチング下面の各節点に設定したバネ要素を削除した割合とする。

解析は図-11 に示すように、洗掘方向が異なる以下の 3 ケースで行い、結果は洗掘の割合に対する橋台の傾斜角としてまとめる。

- Case1: 橋軸方向 (河道→橋台背面)
- Case2: 橋軸直角方向 (上流→下流)
- Case3: 斜め方向 (河道・上流→橋台背面・下流)

橋台の傾斜角は図-11 に示す①~③のフーチング下面の隅角部の鉛直変位のうち、橋軸方向回りと橋軸直角方向回りでそれぞれ 2 点の鉛直変位から、図-12 のように次式で求める。

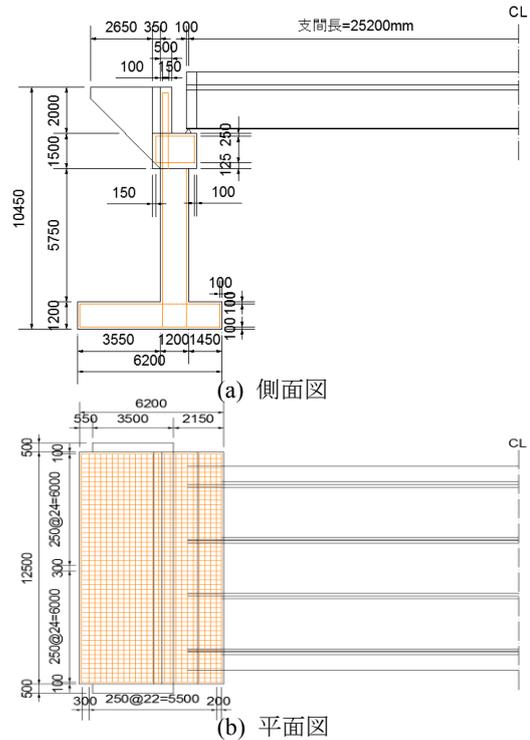


図-9 解析対象橋梁

表-1 支点部バネ定数 (N/mm)

	並進方向			回転方向		
	x	y	z	R <sub>x</sub>	R <sub>y</sub>	R <sub>z</sub>
可動側	$1.0 \times 10^5$	0	$1.0 \times 10^5$	0	$1.0 \times 10^5$	
固定側	$1.0 \times 10^5$			0		

表-2 各部材物性値

部材	材料	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	重量密度 (N/mm <sup>3</sup> )
橋台躯体・ウイング	Fc21	21682	0.2	0.000024
支承	SF490A	200000	0.3	0.000077
床版	Fc24	22668	0.2	0.000024
主桁	SM490Y	205000	0.3	0.000077
鉄筋	SD345	200000	0.3	0.000077

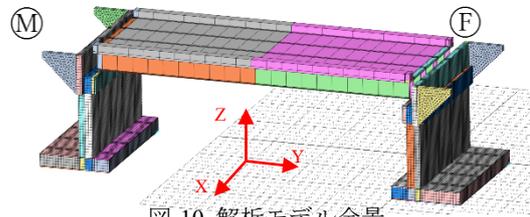


図-10 解析モデル全景

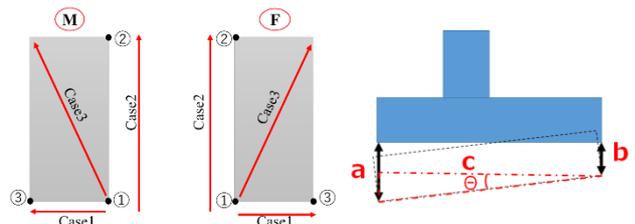


図-11 解析ケース

図-12 傾斜角度の求め方 (橋軸直角回り)

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{a-b}{c} \right) \quad (1)$$

### 3.2 解析結果と考察

本節では解析結果のうち、橋台の鉛直変位から求めた傾斜角について述べる。図-13～図-15 は可動側、固定側橋台で洗掘の割合に対する傾斜角を算出した結果である。橋軸直角回りは可動側が負、固定側が正で河道側への傾斜、橋軸回りは両側とも正で上流側への傾斜とする。

Case 1 の図-13 では洗掘方向が橋軸方向の場合、洗掘割合 40%で河道側に大きく傾斜し 50%で橋台が転倒した状態になる。しかしながら、本解析では桁端の橋台パラペットへの接触は考慮しておらず、考慮した場合には桁が橋台を拘束する可能性もある。また図-14 の洗掘方向が橋軸直角方向の Case 2 では、洗掘割合が 90%を超えても傾斜角は最大 1.5° にとどまり、橋台が転倒することはなかった。

図-15 の洗掘方向が斜め方向の Case 3 では、洗掘の進行に伴い両橋台とも、上流側かつ河道側に傾斜した。傾斜角は Case2 より大きく推移し、洗掘割合 70%を超えたときに急増し、橋台が転倒する状態となる。第 2 章の実験モデルとは異なる解析モデルのため、定量的な比較はできないが、洗掘の進行につれて傾斜が増大する傾向やその方向については整合している。このことから、橋台基礎が斜め方向に洗掘を受けた場合、一定の洗掘割合を超えると橋台の傾斜が急激に進行する可能性があるが、Case 1 同様に桁と橋台の接触について検討が必要である。

また、Case2 と Case3 の解析結果から、洗掘割合が比較的低い範囲では、可動側と固定側での傾斜角はほぼ同じ値だが、転倒直前には可動側の傾斜角が大きくなった。このような傾斜角が大きくなった場合の橋梁の挙動については、桁端部のパラペットへの衝突やひび割れの発生状況なども含めて、今後さらに検討が必要である。

### 4. まとめ

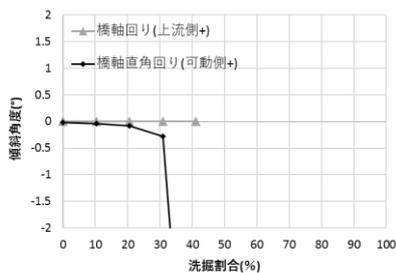
本研究では、直接基礎のパラレルタイプの橋台を有する単純桁橋を対象に、実験水路を用いた河川増水時の再現実験と、有限要素法による非線形静的解析によって被災状況を再現した。

実験では、フーチングに対して上流側・水路側の斜め方向から洗掘が進行し、橋台の傾斜が進行する状況を確認した。また、非線形静的解析では、典型的なパラレルタイプの橋台を有する解析対象橋梁に対して、橋軸方向、橋軸直角方向のほか実験と同様に斜め方向に洗掘させた解析を行った。その結果、橋軸方向からの洗掘に対しては、フーチング底面がある一定の割合の洗掘を受けると急激に傾斜が増大し、橋軸直角方向については、鉛直方向に沈下しながら緩やかに傾斜する結果となった。実験結果に対応した斜め方向からの洗掘に対しては、実験と同様の傾向が得られたが、実際の現象を適切に再現するためには、桁と下部構造との接触や地盤のモデル化など今後さらに検討する必要がある。

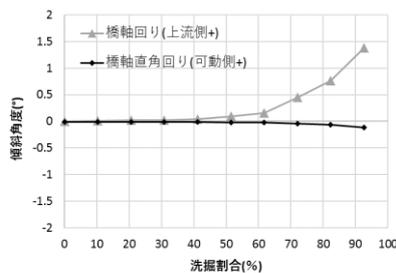
**謝辞：**本研究の屋外開水路の実験に際しては国土交通省北海道開発局網走開発建設部に協力いただきました。また、洗掘深の計測とデータ処理に際しては北見工業大学博士前期課程の大平緩斗氏、工学部の柴田祐貴氏に協力いただきました。ここに記して感謝いたします。

### 参考文献

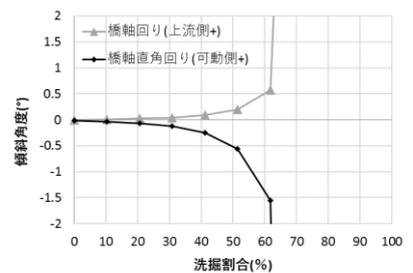
- 1) (公社)地盤工学会平成 28 年 8 月北海道豪雨による地盤災害調査団:平成 28 年 8 月北海道豪雨による地盤災害調査報告書, 2017.
- 2) 社団法人 日本道路協会:道路橋示方書(共通編・下部構造編)・同解説, 社団法人日本道路協会, pp276-280,pp283-287,2012



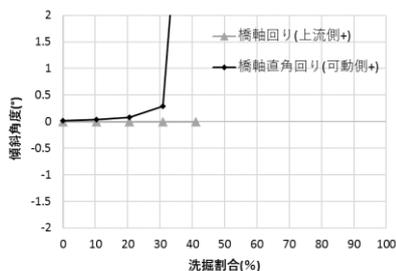
(a) 可動側 (橋軸方向洗掘)



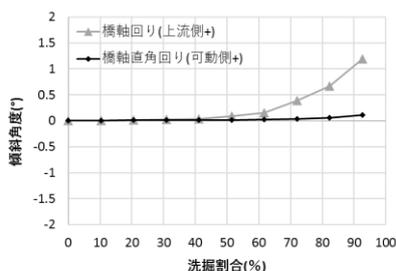
(a) 可動側 (橋軸直角方向洗掘)



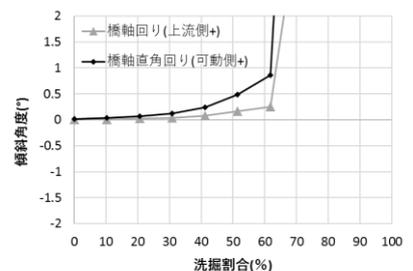
(a) 可動側 (斜め方向洗掘)



(b)固定側 (橋軸方向洗掘)  
図-13 洗掘割合に対する  
橋台傾斜角度(Case1)



(b)固定側 (橋軸直角方向洗掘)  
図-14 洗掘割合に対する  
橋台傾斜角度(Case2)



(b)固定側 (斜め方向洗掘)  
図-15 洗掘割合に対する  
橋台傾斜角度(Case3)